



高职高专“十二五”电气信息类规划教材

电路基础



DIANLU JICHU

侯卓生 焦舒玉 / 主编



华中科技大学出版社

<http://www.hustp.com>

高职高专“十二五”电气信息类规划教材

电 路 基 础

主 编	侯卓生	焦舒玉
副主编	汤 燕	
参 编	陈江宁	马金燕
	魏倩茹	孙 娜

华中科技大学出版社
中国·武汉

内 容 提 要

本书在结构、内容安排等方面融入了编者多年来的教学经验,力求全面体现高等职业教育的特点,满足当前教学的需要。

本书包括电路的基本概念和基本定律、电路的基本分析方法、电路的基本定理、正弦交流电路及其应用、三相交流电路、互感与谐振电路、非正弦周期电流电路、线性动态电路分析、二端网络 9 章内容。

本书是全国高职高专“十二五”电气信息类规划教材,可作为高职高专院校电路基础课程的教学用书。

图书在版编目(CIP)数据

电路基础/侯卓生 焦舒玉 主编. —武汉:华中科技大学出版社,2011.8
ISBN 978-7-5609-7189-6

I. 电… II. ①侯… ②焦… III. 电路理论-高等职业教育-教材 IV. TM13

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 129334 号

电路基础

侯卓生 焦舒玉 主编

策划编辑:田 密

责任编辑:熊 慧

封面设计:潘 群

责任校对:周 娟

责任监印:张正林

出版发行:华中科技大学出版社(中国·武汉)

武昌喻家山 邮编:430074 电话:(027)87557437

录 排:武汉佳年华科技有限公司

印 刷:华中科技大学印刷厂

开 本:787mm×1092mm 1/16

印 张:12.25

字 数:310 千字

版 次:2011 年 8 月第 1 版第 1 次印刷

定 价:21.80 元



本书若有印装质量问题,请向出版社营销中心调换
全国免费服务热线:400-6679-118 竭诚为您服务
版权所有 侵权必究

前 言

本书共分为 9 章,在编写中将传统的电路课程内容进行了重新规划和整合,注重对学生素质及实践能力、创新能力的培养,突出了以下几个方面特点。

(1) 理论和实践相结合,拓宽学生的视野。

(2) 将理论教学和实践教学融为一体,既是理论学习的参考书,又是实验实训指导书。在实验实训项目的选取上,精心挑选了 12 个项目,锻炼学生的实践能力和工程技能。

(3) 每章开始都有针对本章的教学要求,章后有本章小结和习题,梳理了教学重点,便于学生自学和检验,培养了学生的自学能力。

本书第 1 章由孙娜老师编写,第 2、3 章由马金燕老师编写,第 4、5 章由魏倩茹老师编写,第 6、7 章由陈江宁老师编写,第 8、9 章由汤燕老师编写。全书由侯卓生教授和焦舒玉教授最终审稿。

本书可作为相关高职高专电力系统自动化、电气自动化、发电厂及电力系统自动化等专业的教材,也可作为电力行业的培训教材。

编 者

2011 年 5 月

目 录

第 1 章 电路的基本概念和基本定律	(1)
1.1 电路和电路模型	(1)
1.2 电路中的基本物理量	(2)
1.3 电路元件	(5)
1.4 电路中的电源元件	(8)
1.5 电路的工作状态	(11)
1.6 基尔霍夫定律	(12)
实验项目 1 电位、电压的测定及电位图的绘制	(14)
实验项目 2 基尔霍夫定律的验证	(15)
本章小结	(16)
习题 1	(17)
第 2 章 电路的基本分析方法	(18)
2.1 等效电路的概念	(18)
2.2 电阻的串联、并联和混联电路	(18)
2.3 电阻的星形与三角形连接及其等效变换	(21)
2.4 电源的等效变换	(24)
2.5 支路电流法	(28)
2.6 网孔电流法	(31)
2.7 节点电位法	(34)
本章小结	(38)
习题 2	(38)
第 3 章 电路的基本定理	(43)
3.1 叠加定理	(43)
3.2 戴维南定理与诺顿定理	(45)
3.3 最大功率传输定理	(49)
3.4 替代定理	(50)
3.5 含受控源电路的分析	(52)
实验项目 3 叠加定理的验证	(55)
实验项目 4 戴维南定理和诺顿定理的验证	(57)
本章小结	(60)
习题 3	(61)
第 4 章 正弦交流电路及其应用	(64)
4.1 正弦交流电的基本概念	(64)
4.2 正弦量的相量表示法	(67)
4.3 电路定律的相量形式	(70)

4.4	复阻抗和复导纳	(75)
4.5	用相量法分析正弦交流电路	(79)
4.6	正弦交流电路中的功率	(83)
实验项目 5	用三表法测量电路等效参数	(86)
实验项目 6	日光灯电路的安装与功率因数的提高	(87)
本章小结		(89)
习题 4		(91)
第 5 章	三相交流电路	(94)
5.1	三相电源与三相负载	(94)
5.2	对称三相电路的计算	(99)
5.3	不对称三相电路的计算	(102)
5.4	三相电路的功率及其测量	(103)
实验项目 7	功率因数及相序的测量	(108)
实验项目 8	三相交流电路电压、电流的测量	(109)
实验项目 9	三相电路功率的测量	(111)
本章小结		(114)
习题 5		(115)
第 6 章	互感与谐振电路	(117)
6.1	互感与互感电压	(117)
6.2	互感线圈的同名端	(118)
6.3	互感线圈的串、并联	(120)
6.4	空心变压器	(122)
6.5	理想变压器	(123)
6.6	串联谐振电路	(124)
6.7	并联谐振电路	(126)
实验项目 10	互感电路观测	(126)
实验项目 11	串联谐振电路的研究	(128)
本章小结		(129)
习题 6		(130)
第 7 章	非正弦周期电流电路	(132)
7.1	非正弦周期信号	(132)
7.2	非正弦周期信号及其分解	(132)
7.3	非正弦周期信号的有效值、平均值和功率	(136)
7.4	非正弦周期电路的计算	(138)
本章小结		(140)
习题 7		(141)
第 8 章	线性动态电路分析	(142)
8.1	换路定律	(142)
8.2	一阶电路的零输入响应	(144)
8.3	一阶电路的零状态响应	(147)

8.4 一阶电路的全响应	(149)
8.5 三要素法求解一阶电路	(150)
8.6 一阶电路的阶跃响应	(154)
实验项目 12 动态电路零输入响应的研究	(156)
本章小结	(158)
习题 8	(159)
第 9 章 二端网络	(161)
9.1 二端网络的概述	(161)
9.2 二端网络的基本方程和参数	(162)
9.3 二端网络的等效电路	(171)
9.4 二端网络的阻抗和传输函数	(173)
9.5 二端网络的应用	(175)
本章小结	(177)
习题 9	(177)
附录 A 答案	(180)
参考文献	(188)

第 1 章 电路的基本概念和基本定律

教学目标

本章介绍电路、电路模型的概念,电流、电压及其参考方向,定义电阻、电容、电感等基本电路元件,着重阐述电路分析中最基本的规律——基尔霍夫定律。要求能正确画出简单设备的电路图,理解电路模型的含义;掌握电功率和电能的计算方法;能正确标出各电量的参考方向,明确参考方向与实际方向的关系;理解并掌握基尔霍夫定律,能将 KCL、KVL 应用到电路分析中。

1.1 电路和电路模型

【案例 1-1】 手电筒电路是一种常用的简单实用电路。这个电路由一个电源(干电池)、一个负载(小灯泡)、一个开关和若干导线所组成,如图 1-1 所示。

1. 电路的概念

电路是电流流通的闭合路径,是为了实现特定的功能将某些电气设备和元器件按一定方式连接而成的一个集合体。电路又称回路,由电源、负载和中间环节三个部分组成。电路中提供电能的设备或元器件称为电源(如电池);电路中吸收电能或输出信号的元器件称为负载(如电灯);中间环节是连接电源和负载的部分(如导线),用来传输和控制电能。

实际电路在日常生活中随处可见,种类繁多,功能各异,但按其功能可概括为两种类型。一是实现电能的传输、转换和分配的电路。在图 1-1 所示的实际电路中,开关闭合后,储存在干电池中的化学能转换为电能,经导线供给灯泡使用,灯泡则将电能转换为光能和热能。二是实现对信号处理的电路。手机、电视电路就是这类电路的实例。

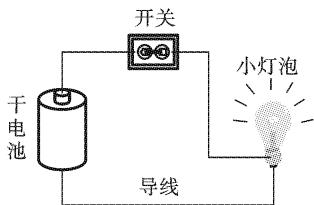


图 1-1 手电筒实际电路图

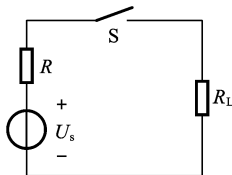


图 1-2 手电筒电路模型

2. 电路模型

为研究电路的基本规律,需要根据实际元件的物理性能建立理想模型。由理想元件组成的电路称为电路模型。在电路分析中,用电路模型代替实际电路进行分析和研究。例如,案例 1-1 中的手电筒电路,其实际电路元件包括干电池、灯泡、开关和导线,电路模型如图 1-2 所示。

图 1-2 所示电路中, U_s 和 R 是实际电压源的符号,电阻 R_L 是一个以消耗电能为主的实际负载的符号, S 是控制开关,导线是可忽略电阻的连接线。

本书中所研究的电路都是由理想元件构成的电路模型,而不是实际电路。

3. 电路的分类

实际电路可分为集总参数电路和分布参数电路两大类。一个实际电路当其几何尺寸(d)远小于电路中电磁波的波长(λ)时,就称为集总参数电路,否则就称为分布参数电路。

1.2 电路中的基本物理量

电路中涉及的物理量主要有电压、电流、电荷、电位、功率等,本节主要讲述这些物理量及其相关的概念。

1. 电流及电流的参考方向

1) 电流的概念

电荷的定向移动称为电流。电流的方向规定为正电荷运动的方向,电流的大小用电流强度来衡量。电流强度在数值上等于单位时间内通过导体横截面的电量。电流强度用 i 表示。

$$i = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta q}{\Delta t} = \frac{dq}{dt} \quad (1-1)$$

式中, Δq 为极短时间 Δt 内通过导体横截面的电荷量; i 随时间变化按一定规律变化,因此它是时间的函数。

大小和方向都不随时间变化而变化的电流称为稳恒电流,也称为直流(DC),这时电流强度用 I 表示,式(1-1)可写成

$$I = \frac{q}{t} \quad (1-2)$$

式中, q 为时间 t 内通过导体横截面的电荷量。

在 SI(国际单位制)中,电荷的基本单位是库仑(C),时间的基本单位是秒(s),电流的基本单位是安培,简称安(A),常用的电流单位还有千安(kA)、毫安(mA)、微安(μ A)等。

$$1 \text{ kA} = 10^3 \text{ A}, \quad 1 \text{ mA} = 10^{-3} \text{ A}, \quad 1 \mu\text{A} = 10^{-6} \text{ A}$$

2) 电流的参考方向

电流的实际方向是客观存在的,但在复杂电路的分析中,电路中电流的实际方向很难预先判断,为此引入“参考方向”这一概念。在欲分析的电路中,先任意假设电流的参考方向,用箭头表示。引入参考方向后,电流 i 是代数量,其大小和方向均含在其中,设定的参考方向是确定电流为正的标准,因此参考方向也称为正方向。当 $i > 0$ 时,参考方向和实际方向一致;当 $i < 0$ 时,参考方向和实际方向相反,如图 1-3 所示。

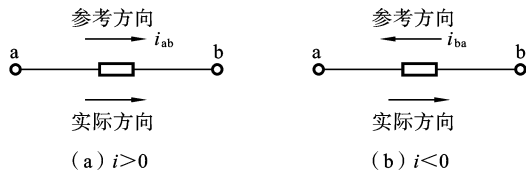


图 1-3 电流及其参考方向

电流的参考方向还可以用双下标表示,如图 1-3 中, i_{ab} 就表示电流的参考方向是从 a 点指向 b 点,当参考方向改变时有 $i_{ab} = -i_{ba}$ 。注意,在未规定参考方向的情况下,电流的正、负号是没有意义的。

【例 1-1】 当图 1-4 所示电路中电流分别为 $i = 2 \text{ A}$ 和 $i = -2 \text{ A}$ 时,确定正电荷移动的方

向。

解 (1) $i > 0$, 即 $i = 2 \text{ A}$ 时, 参考方向和实际方向一致, 正电荷从 $a \rightarrow b$ 移动。

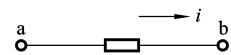


图 1-4 例 1-1 电路图

(2) $i < 0$, 即 $i = -2 \text{ A}$ 时, 参考方向和实际方向相反, 正电荷从 $b \rightarrow a$ 移动。

2. 电压、电位及电压的参考方向

1) 电压、电位的概念

电路中 a 、 b 两点间的电压表明单位正电荷由 a 点移到 b 点时所做的功, 用 u_{ab} 表示, 即

$$u_{ab} = \lim_{\Delta q \rightarrow 0} \frac{\Delta W_{ab}}{\Delta q} = \frac{dW_{ab}}{dq} \quad (1-3)$$

式中, Δq 为由 a 点移到 b 点的电荷量; ΔW_{ab} 为移动过程中电荷所减少的电能。电压的 SI 单位为伏特, 简称伏 (V), 常用的电压单位还有千伏 (kV)、毫伏 (mV) 和微伏 (μV) 等。

$$1 \text{ kV} = 10^3 \text{ V}, \quad 1 \text{ mV} = 10^{-3} \text{ V}, \quad 1 \mu\text{V} = 10^{-6} \text{ V}$$

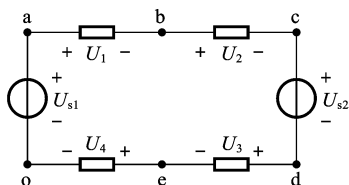
在电路中任选一点作为参考点, 则某点的电位就是由该点到参考点的电压。电位用符号 V 表示, 电位的单位与电压的单位相同。例如, a 、 b 两点的电位分别表示为 V_a 、 V_b , a 、 b 两点间的电压与该两点的电位有如下关系:

$$U_{ab} = V_a - V_b \quad (1-4)$$

电位与电压的主要区别在于: 电路中两点间的电压数值是绝对的, 与参考点的选择无关; 电路中某一点的电位是相对的, 取决于参考点的选择, 参考点不同, 同一点的电位也就不同。

【例 1-2】 图 1-5 所示电路中, o 点为参考点, 各元件上电压分别为 $U_{s1} = 20 \text{ V}$, $U_{s2} = 4 \text{ V}$, $U_1 = 8 \text{ V}$, $U_2 = 2 \text{ V}$, $U_3 = 5 \text{ V}$, $U_4 = 1 \text{ V}$ 。试求 U_{ac} 、 U_{bd} 、 U_{be} 和 U_{ae} 。

解 选 o 点为参考点, 所以 o 点电位 $V_o = 0$ 。其他各点的电位分别为



$$V_a = U_{s1} = 20 \text{ V}$$

$$V_b = -U_1 + U_{s1} = (-8 + 20) \text{ V} = 12 \text{ V}$$

$$V_c = -U_2 - U_1 + U_{s1} = (-2 - 8 + 20) \text{ V} = 10 \text{ V}$$

$$V_d = U_3 + U_4 = (5 + 1) \text{ V} = 6 \text{ V}$$

$$V_e = U_4 = 1 \text{ V}$$

图 1-5 例 1-2 图

根据式 (1-4), 求出两点间电压分别为

$$U_{ac} = V_a - V_c = (20 - 10) \text{ V} = 10 \text{ V}, \quad U_{bd} = U_b - U_d = (12 - 6) \text{ V} = 6 \text{ V}$$

$$U_{be} = U_b - U_e = (12 - 1) \text{ V} = 11 \text{ V}, \quad U_{ae} = U_a - U_e = (20 - 1) \text{ V} = 19 \text{ V}$$

2) 电压的参考方向

两点间电压的实际方向由高电位指向低电位。在欲分析的电路中, 先任意假设电压的参考方向, 用“+”和“-”表示, 或者用双字母下标、实线箭头表示。引入参考方向后, 电压 u 为代数量, 其大小和方向均含在其中。当 $u > 0$ 时, 参考方向和实际方向一致; 当 $u < 0$ 时, 参考方向和实际方向相反, 如图 1-6 所示。

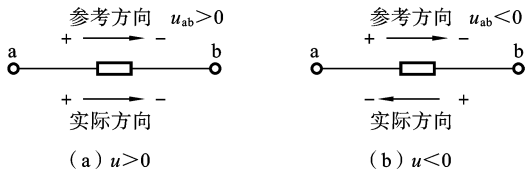


图 1-6 电压的参考方向

通常,为了简化电路分析,将某元件上电压与电流的参考方向选为一致,即电流的参考方向由电压的“+”指向“-”,这样选定的参考方向称为电流与电压的关联参考方向,简称关联方向,反之,称为非关联参考方向,如图 1-7 所示。

3. 电动势

电动势是一个表征电源特征的物理量。电源的电动势是电源将其他形式的能转化为电能的本领,在数值上,等于非静电力将单位正电荷从电源负极通过电源内部移送到电源正极所做的功。它具有克服导体电阻对电流的阻力,使电荷在闭合的导体回路中流动的作用。电动势常用符号 E (有时也可用 ϵ) 表示,单位是伏(V)。电动势的方向规定为从电源内部的负极(低电位端)指向正极(高电位端),用箭头表示,如图 1-8 所示。

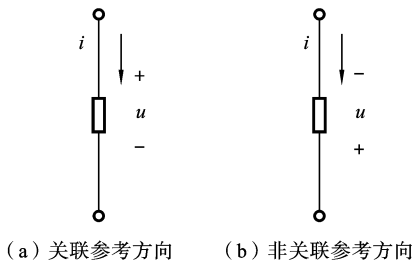


图 1-7 电压、电流的参考方向

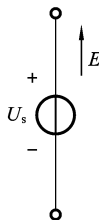


图 1-8 电动势的正方向

4. 电功率和电能

1) 电功率

单位时间内电场力所做的功称为电功率,简称功率,用符号 P 或 p 表示。

$$p = \frac{dW}{dt} = \frac{dW}{dq} \cdot \frac{dq}{dt} = ui \quad (1-5)$$

在直流电路中,有

$$P = UI \quad (1-6)$$

计算电路元件的功率时,首先要判断电压与电流的参考方向是否为关联参考方向:若电压、电流的参考方向为关联参考方向,则 $P = UI$;若为非关联参考方向,则 $P = -UI$ 。用式(1-5)计算电路功率时,若 $p > 0$,则该电路吸收功率,若 $p < 0$,则该电路实际发出或释放功率。功率的单位为瓦特,简称瓦(W),常用的单位还有兆瓦(MW)、千瓦(kW)、毫瓦(mW)等。

$$1 \text{ MW} = 10^6 \text{ W}, \quad 1 \text{ kW} = 10^3 \text{ W}, \quad 1 \text{ mW} = 10^{-3} \text{ W}$$

【例 1-3】 计算图 1-9 中各元件的功率,指出是释放功率还是吸收功率。

解 图 1-9(a)中,电压、电流的参考方向为关联参考方向,由 $P = UI$ 得

$$P = 2 \times (-3) \text{ W} = -6 \text{ W} < 0$$

故释放功率。

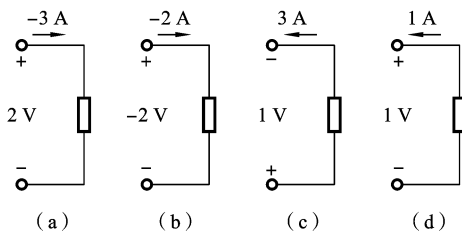


图 1-9 例 1-3 图

图 1-9(b)中,电压、电流的参考方向为关联参考方向,由 $P = UI$ 得

$$P = (-2) \times (-2) \text{ W} = 4 \text{ W} > 0$$

故吸收功率。

图 1-9(c)中,电压、电流的参考方向为关联参考方向,由 $P = UI$ 得

$$P = 1 \times 3 \text{ W} = 3 \text{ W} > 0$$

故吸收功率。

图 1-9(d) 中, 电压、电流的参考方向为非关联参考方向, 由 $P = -UI$ 得

$$P = -(1 \times 1) \text{ W} = -1 \text{ W} < 0$$

故释放功率。

2) 电能

电能就是电场力所做的功, 用符号 W 来表示, 单位是焦耳(J)。当正电荷 dq 在时间 dt 内由电路中的 a 点到 b 点时, ab 段电路吸收的能量为 $dW = udq$, 又 $dq = idt$, 故 $dW = uiddt$, 若通电时间由 t_0 到 t , 则电路中的电能为功率对时间的积分, 即

$$W = \int_{t_0}^t uiddt \quad (1-7)$$

直流电路中, 负载功率不随时间变化而变化, 在时间 t 内, 负载吸收的电能为

$$W = Uq = UI t = U^2 t / R = I^2 R t = P t \quad (1-8)$$

电能的常用单位还有 $\text{kW} \cdot \text{h}$ (千瓦·时), $1 \text{ kW} \cdot \text{h}$ 的电能通常称为 1 度电。

$$1 \text{ kW} \cdot \text{h} = 1\,000 \text{ W} \times 3\,600 \text{ s} = 3.6 \times 10^6 \text{ J}$$

1.3 电路元件

【案例 1-2】 单相异步电动机属于感性负载, 它常用于功率不大的电动工具(如电钻、搅拌机)和众多的家用电器(如洗衣机、电风扇、抽油烟机等)中。图 1-10 所示的是吊扇的电气原理图。其中, L_A 、 L_B 分别是单相异步电动机 M 的工作绕组、启动绕组; 电容 C 是启动电容, 它与启动绕组 L_B 串联; S 是开关; 电感 L 是调速电抗器。

1. 电阻元件

电阻元件是从实际电阻器抽象出来的理想化模型, 是代表电路中消耗电能这一物理现象的理想二端元件, 在电路图中用字母 R 或 r 表示。电阻的 SI 单位是欧姆, 简称欧(Ω)。电阻的倒数称为电导, 用字母 G 表示, 即

$$G = \frac{1}{R} \quad (1-9)$$

电导的 SI 单位为西门子, 简称西(S)。电导是衡量材料导电能力的参考量, 电阻越大, 电导越小, 导电性能越差; 反之, 电阻越小, 电导越大, 导电性能越好。

在电路分析中, 电阻元件是耗能元件的理想化模型, 在讨论各种理想元件的性能时, 最重要的是确定电阻端电压与电流的关系, 在关联参考方向下, 电阻元件的电压与电流的关系为

$$U = RI \quad (1-10)$$

式(1-10)就是著名的欧姆定律。从式(1-10)推出

$$R = \frac{U}{I}, \quad I = \frac{U}{R} \quad (1-11)$$

电阻元件的功率为

$$P = UI = \frac{U^2}{R} = I^2 R \quad (1-12)$$

电阻元件的特性用其电流与电压的代数关系表示, 称为电压电流关系(CVR), 也称伏安

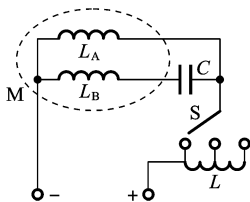


图 1-10 吊扇的电气原理图

特性,可以用电流为横坐标,电压为纵坐标的直角坐标系中的曲线来表示,称为电阻元件的伏安特性曲线。电阻元件,若其伏安特性不随时间变动,则称为定常电阻,否则称为时变电阻。若定常电阻元件的伏安特性曲线是通过坐标原点的直线,则这种电阻元件称为线性电阻元件;若其伏安特性是通过坐标原点的曲线,则这种电阻元件称为非线性电阻元件。线性电阻元件的电路符号如图 1-11(a)所示,线性电阻元件的伏安特性曲线如图 1-11(b)所示,是通过坐标原点的直线,表示电压与电流成正比。

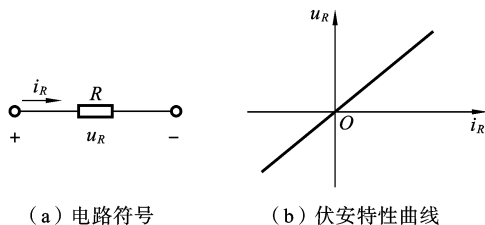


图 1-11 线性电阻元件的电路符号及伏安特性曲线

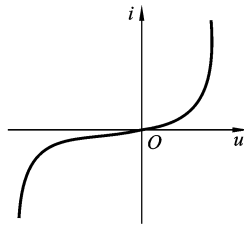


图 1-12 二极管的伏安特性曲线

在工程上,还有许多电阻元件,其伏安特性曲线是一条过原点的曲线,这样的电阻元件就是非线性电阻元件。如图 1-12 所示的曲线是非线性电阻元件二极管的伏安特性曲线。

2. 电感元件

电感元件(简称电感)是指电感器(电感线圈)和各种变压器,是一种储能元件。电感的原始模型为导线绕成的圆柱线圈,当线圈中通以电流 i 时,线圈中就会产生磁通量 Φ ,并储存能量。电感用 L 表示,它在数值上等于单位电流产生的磁链。对于 N 匝线圈,与整个线圈相交链的总磁通称为线圈的磁链,用 Ψ 表示,则

$$\Psi = \Phi_1 + \Phi_2 + \cdots + \Phi_N \quad (1-13)$$

式中, $\Phi_1, \Phi_2, \cdots, \Phi_N$ 分别为第 1, 2, $\cdots, N$ 个线匝所交链的磁通。

如果线圈绕得非常紧密,则可以认为

$$\Phi_1 = \Phi_2 = \cdots = \Phi_N = \Phi \quad (1-14)$$

电感是实际线圈的理想化模型,是一个二端理想化元件。任何时刻,电感的磁链 Ψ 与电流 i 成正比,即

$$\Psi = Li \quad (1-15)$$

式中, L 为线圈的自感或电感,是与电流、磁链无关的正实常数。这种理想化的线圈就是线性电感元件,参数是自感或电感 L 。电感的单位是亨利,简称亨(H),常用的电感单位还有毫亨(mH)、微亨(μH),它们之间的换算关系为

$$1 \text{ mH} = 10^{-3} \text{ H}, \quad 1 \mu\text{H} = 10^{-6} \text{ H}$$

线性电感元件的电路符号如图 1-13(a)所示,其 Ψ - i 特性曲线如图 1-13(b)所示,其特性曲线是通过坐标原点的一条直线。

选择某一时刻的电流 i_L 、电感两端的电压 u_L 和磁链 Ψ_L , u_L 和 i_L 参考方向关联, Ψ_L 和 i_L 满足右手螺旋定则,即 Ψ_L 和 i_L 的参考方向关联,如图 1-14 所示,则 Φ_L 和 u_L 的参考方向也彼此关联。

此时,自感磁链

$$\Psi_L = Li_L \quad (1-16)$$

而自感电压

$$u_L = \frac{d\Psi_L}{dt} = \frac{d(Li_L)}{dt} \quad (1-17)$$

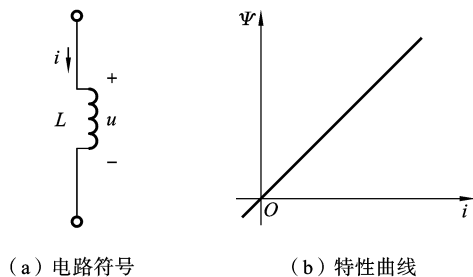


图 1-13 线性电感元件的电路符号及其特性曲线

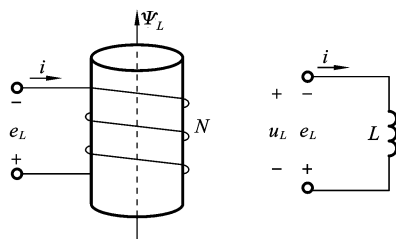


图 1-14 电流、电压和磁通的参考方向关联

若电感为线性元件,则

$$u_L = L \frac{di_L}{dt} \quad (1-18)$$

由式(1-18)可知,线性电感元件上的电压与其电流变化率成正比。电流变化越快,感应电压越高;电流变化越慢,感应电压越低;当电流是不随时间变化而变化的直流电时,感应电压为零,所以在直流电路中,电感相当于短路。

在电压和电流关联参考方向下,电感吸收的功率为

$$p = ui = iL \frac{di_L}{dt} \quad (1-19)$$

电感储存磁场能,其大小为

$$W_L = \frac{1}{2} L i_L^2 \quad (1-20)$$

3. 电容元件

把两块金属板用绝缘介质隔开就构成了一个简单的电容。电容的基本特征是可容纳电荷。电荷的聚集过程也就是电场建立的过程,这一过程中,外力所做的功应等于电容所存储的能量。因此,也可以说电容是一种储能元件。

电容的特性用两极板间的电压 u 和极板上存储的电荷 q 来表示,二者之间的关系可以用 $q-u$ 坐标平面上的一条曲线来表示,若该曲线是一条通过坐标原点的直线,则此电容称为线性电容,直线的斜率就是电容的电容量 C ,即

$$C = \frac{q}{u} \quad (1-21)$$

电容 C 的 SI 单位为法拉,简称法(F),实际电容往往比 1 F 小得多,因此常用微法(μF)、皮法(pF)等单位。

$$1 \text{ F} = 10^6 \mu\text{F} = 10^{12} \text{ pF}$$

线性电容的电路符号及其在 $q-u$ 平面上的特性曲线如图 1-15 所示。

当极板间电压 u 变化时,极板上的电荷 q 也随之变化,电容中出现电流。若规定电压、电

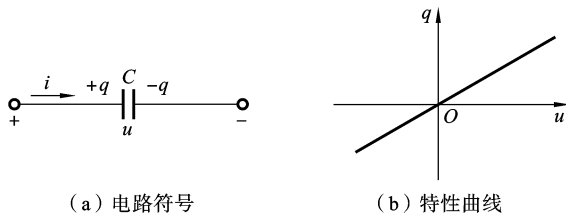


图 1-15 线性电容的电路符号及其特性曲线

流的参考方向关联,则电流为

$$i = \frac{dq}{dt} = C \frac{du}{dt} \quad (1-22)$$

式(1-22)表明线性电容任何时刻的电流只与该时刻的电压变化率成正比。电压 u 增高时, $\frac{du}{dt} > 0$, $\frac{dq}{dt} > 0$, $i > 0$, 极板上电荷量增加, 电容充电; 电压 u 降低时, $\frac{du}{dt} < 0$, $\frac{dq}{dt} < 0$, $i < 0$, 极板上电荷量减少, 电容放电。只有当极板上的电荷量发生变化, 因而极板间的电压也发生变化, 如充、放电时, 电容支路中才形成电流。因此, 电容也称为动态元件。如果极板间的电压不随时间变化而变化, 即为直流电压时, 则由于没有电荷的转移, 电容支路中不会形成电流。这时, 电容两端虽有电压, 电流却等于零, 这就是电容的隔直作用。

电容充电后存储电场能, 且电场能的大小为

$$W_C = \frac{1}{2} C u_C^2 \quad (1-23)$$

1.4 电路中的电源元件

【案例 1-3】 蓄电池是一种常见的电源, 它多用于汽车、电力机车、应急灯等, 图 1-16 所示的是汽车照明灯的电气原理图。其中, R_A 、 R_B 是一对汽车照明灯; S 是开关; U_s 是 12 V 的蓄电池。

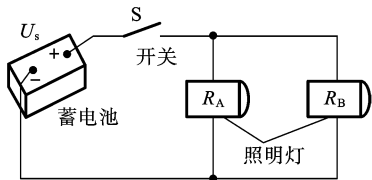


图 1-16 汽车照明灯的电气原理图

凡是向电路提供能量或信号的设备称为电源。电源有两种类型: 其一为电压源, 其二为电流源。电压源的电压不随其外电路变化而变化, 电流源的电流也不随其外电路变化而变化, 因此, 电压源和电流源统称为独立电源, 简称独立源。

在电子电路的模型中还有另一种电源, 它的电压和电流不是独立的, 而是受电路中另一处电压或电流控制的, 这种电源称为受控源或非独立源。

1. 理想电压源与实际电压源

凡是端电压保持恒定值 U_s , 或端电压 $U_s(t)$ 是某一固定的时间函数, 而与流经其中的电流无关的电源称为理想电压源。理想电压源有两个基本特点。

- (1) 无论外电路如何变化, 它的端电压总保持恒定值 U_s , 或为一定的时间函数 $U_s(t)$ 。
- (2) 通过电压源的电流不仅取决于电压源, 还取决于外电路。

理想电压源的表示方法如图 1-17 所示, 其伏安特性曲线如图 1-18 所示。

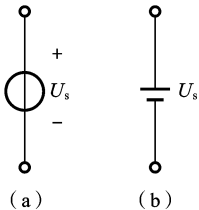


图 1-17 电压源电路符号

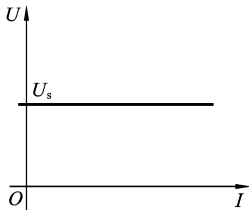


图 1-18 电压源的伏安特性曲线

理想电压源这种二端理想元件是不存在的, 实际电源的端电压都是随其电流的变化而变化的, 例如, 干电池, 接通负载后, 其端电压就会降低, 这是因为电源内部有内阻。实际的直流电压源可用数值等于 U_s 的理想电压源和一个内阻 R_i 相串联的模型来表示, 如图 1-19 所示。

实际直流电压源的端电压为

$$U = U_s - U_R = U_s - IR_i$$

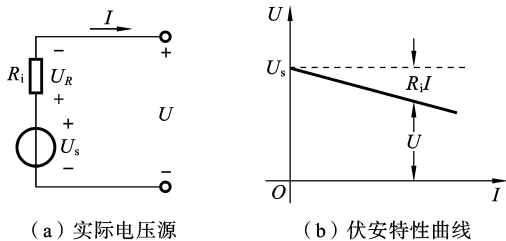


图 1-19 实际电压源及其伏安特性曲线

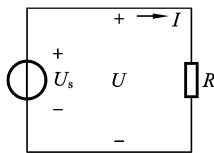


图 1-20 例 1-4 图

【例 1-4】 图 1-20 所示电路中, 直流电压源的电压 $U_s = 10 \text{ V}$ 。求:

- (1) $R = \infty$ 时的电压 U 、电流 I ;
- (2) $R = 10 \Omega$ 时的电压 U 、电流 I ;
- (3) $R \rightarrow 0 \Omega$ 时的电压 U 、电流 I 。

解 (1) $R = \infty$ 时, 外电路开路, U_s 为理想电压源, 故

$$U = U_s = 10 \text{ V}$$

则

$$I = \frac{U}{R} = \frac{U_s}{R} = 0$$

(2) $R = 10 \Omega$ 时, $U = U_s = 10 \text{ V}$, 则

$$I = \frac{U}{R} = \frac{U_s}{R} = \frac{10}{10} \text{ A} = 1 \text{ A}$$

(3) $R \rightarrow 0 \Omega$ 时, $U = U_s = 10 \text{ V}$, 则

$$I = \frac{U}{R} = \frac{U_s}{R} \rightarrow \infty$$

2. 理想电流源与实际电流源

输出电流始终保持恒定值 I_s 或是某一固定的时间函数 $I_s(t)$, 而与其两端的电压无关的电源称为理想电流源。理想电流源有两个基本特点。

- (1) 无论外电路如何变化, 它的输出电流为恒定值 I_s , 或为一定的时间函数 $I_s(t)$ 。
- (2) 电流源两端的电压不仅取决于电流源, 还取决于外电路。

理想电流源的表示方法如图 1-21 所示, 伏安特性曲线如图 1-22 所示。

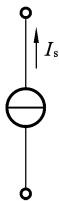


图 1-21 电流源电路符号

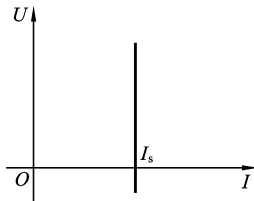
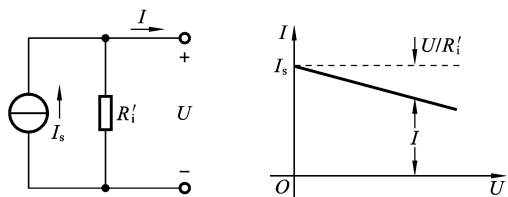


图 1-22 电流源的伏安特性曲线

理想电流源实际上也是不存在的, 实际电流源内部也有能量消耗, 其输出的电流随端电压的变化而变化。

实际的直流电流源可用数值等于 I_s 的理想电流源和一个内阻 R'_i 相并联的模型来表示, 如图 1-23(a) 所示。实际直流电流源的伏安特性曲线如图 1-23(b) 所示。



(a) 实际电流源

(b) 伏安特性曲线

图 1-23 实际电流源及其伏安特性曲线

实际直流电流源的输出电流为

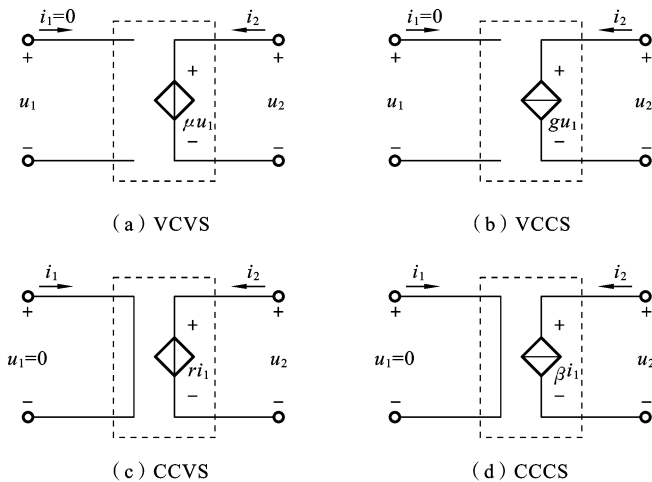
$$I = I_s - \frac{1}{R_i} U \quad (1-24)$$

3. 受控源

受控源是一种四端元件,它含有两条支路,一条是控制支路,另一条是受控支路。受控支路为一个电压源或为一个电流源,它的输出电压或输出电流(称为受控量)受另外一条支路的电压或电流(称为控制量)的控制,该电压源、电流源分别称为受控电压源、受控电流源,统称为受控源。

受控源有两对端钮:一对是施加控制量的端钮,称为输入端钮;另一对是对外提供输出电压(或电流)的端钮,称为输出端钮。根据控制量是电压还是电流,将受控源分为四种类型:电压控制电压源(VCVS)、电压控制电流源(VCCS)、电流控制电压源(CCVS)、电流控制电流源(CCCS)。

受控电压源的电压和受控电流源的电流不是独立的,而是受电路中某个电压或电流控制的。四种受控源的电路符号如图 1-24 所示。



(a) VCVS

(b) VCCS

(c) CCVS

(d) CCCS

图 1-24 四种受控源的电路符号

1) VCVS

VCVS 的电路符号如图 1-24(a)所示,它的特性为

$$u_2 = \mu u_1 \quad (1-25)$$

式中, μ 为电压放大倍数,它是一个量纲为 1 的量。控制量为电压,输入电流为零,即输入端口是开路的。

2) VCCS

VCCS 的电路符号如图 1-24(b)所示,它的特性为

$$i_2 = g u_1 \quad (1-26)$$

式中, g 为转移电导,是一个常量。控制量为电压,输入电流为零,即输入端口是开路的。

3) CCVS

CCVS 的电路符号如图 1-24(c)所示,它的特性为

$$u_2 = r i_1 \quad (1-27)$$